



POLITÉCNICA



Emisiones y eficiencia energética: Experiencias en el ámbito de la Ingeniería Rural

Investigadores de los Grupos de Investigación:

LPF-TAGRALIA. UPM

Laboratorio de Propiedades Físicas y Técnicas Avanzadas en Agroalimentación.

GSC. UPM

Grupo de Sistemas Complejos.

LTS. CENIM. CSIC

Laboratorio de Tecnologías Avanzadas de Sensores.

Coordinadoras: Pilar Barreiro Elorza, Belén Diezma Iglesias

LPF-TAGRALIA. UPM

RESUMEN

El LPF_TAGRALIA es un grupo de investigación reconocido de la UPM que trabaja en diversos ámbitos de la Ingeniería Agroforestal y de Biosistemas, entre los que se encuentra el análisis de emisiones de vehículos agrícolas, y el análisis de la calidad y la eficiencia energética en el transporte a larga distancia de productos perecederos, colaborando asimismo con una variedad de grupos y centros de investigación nacionales e internacionales.

El primero de estos temas: análisis de emisiones de vehículos agrícolas, es objeto de estudio en el LPF_TAGRALIA desde hace aproximadamente diez años, cuando se materializa y cobra relevancia la aplicación del standard TIER de la agencia de protección ambiental americana (EPA) cuyo disparo de salida tuvo lugar en 1996 con la publicación del TIER I. La adopción en USA y Europa de este standard que regula las emisiones de CO₂, óxidos de Nitrógeno y partículas de materia de diversa naturaleza (PM) se está produciendo de manera paulatina en función de la potencia de matriculación de los tractores (vehículos de fuera de carretera, *off-road vehicles*). En la actualidad el standard TIER IV ha de ser verificado mayoritariamente por los tractores, para lo cuál existen dos estrategias básicas: la recirculación de gases de escape (EGR), y la reducción catalítica selectiva (SCR). La verificación del funcionamiento en campo de estas estrategias ha sido materia de análisis y discusión por parte del LPF_TAGRALIA que ejerce desde hace 4 años la labor de Responsable de Ensayos de Campo para el suplemento Maq-Vida Rural, una de las publicaciones más reconocidas por los técnicos que desarrollan su labor en el ámbito de la Ingeniería Rural; los diversos documentos relacionados pueden consultarse en el servicio de acceso abierto también denominado Archivo Digital de la UPM (<http://oa.upm.es/>).

Por otra parte, el análisis de la calidad del transporte de productos perecederos llevado a cabo por el LPF_TAGRALIA se remonta a los comienzos de la década de los 90 del siglo pasado cuando en el marco del Proyecto Europeo CAMAR (1992-1994) se realiza el seguimiento de un transporte de melocotón desde Valencia hasta Hamburgo, efectuando muestras previos y post-transporte. En el transcurso de los años, se han venido sucediendo distintos proyectos entre los que figuran varios financiados por la UPM (SENSOGASES), y dos proyectos



POLITÉCNICA



sucesivos del Plan Nacional de Investigación (SENSOFRIGO y SMART-QC) . Con ellos ha sido posible evaluar y transferir la tecnología relativa al uso de redes inalámbricas de sensores (WSN) que aún se encuentra en sus albores desde el punto de vista de la aplicación industrial. Además, y en los últimos cinco años se ha abordado el desarrollo de una metodología que permita aunar el análisis del transporte (y almacenamiento frigorífico en general) desde el punto de vista de la evolución dinámica de la entalpía del aire (y no sólo de la temperatura o de la humedad relativa por separado) combinada con el análisis de los diagramas de fase asociados, para lo cual la colaboración con el Grupo de Sistemas Complejos de la UPM ha sido fundamental.

En esta ponencia, nos planteamos presentar los resultados más relevantes en ambos ámbitos, con el objetivo de establecer un diálogo abierto y fructífero con otros investigadores y grupos de investigación que tengan interés en ellos.

Evaluación de los sistemas de control de emisiones de los tractores en campo

Uno de los retos actuales en la mecanización agraria es por una parte explicar las mejoras tecnológicas de los tractores a los agricultores y por otra mostrar que es necesario modificar las prácticas habituales de conducción especialmente en lo que a régimen de motor se refiere. Es importante asimismo mostrar que los sistemas de control automatizado de motor y transmisiones suponen un ahorro real de combustible y una reducción del coste de mantenimiento del tractor debido fundamentalmente a la colmatación de filtros de partículas o al exceso de consumo de AdBlue para el post-tratamiento de los gases de escape.

Para llevarlo a cabo el LPF realiza cuatrimestralmente ensayos de campo a instancias de una publicación técnica, Vida Rural, evaluando la diversidad tecnológica del mercado. Desde 2011 se han estudiado cuatro tractores en campo todos ellos de distintas marcas, dos de ellos emplean la tecnología de recirculación de gases de escape con filtro de partículas, EGR DPF, mientras que los otros 2 han optado por el post-tratamiento de los gases de escape con SCR (reducción catalítica selectiva). En tres de los casos se emplea transmisión con cambio automático de marchas, mientras que en una de ellas se emplea transmisión continua CVT. Las estrategias asociadas a la reducción de emisiones pueden entenderse mediante la Fig. 1, donde se compara el efecto del dosado relativo de combustible con la temperatura de la cámara de combustión. La consecución de bajos niveles de materia particulada (PM) y NOx puede obtenerse reduciendo la temperatura en la cámara de combustión y el dosado mediante recirculación de gases de escape (línea azul mínima recirculación y línea verde máxima recirculación), aunque esta estrategia puede comprometer la potencia instantánea del tractor. En la segunda estrategia se opta por emplear un bajo dosado con alta temperatura y emplear posteriormente un post-tratamiento de gases con un reductor catalítico selectivo que emplea AdBlue.

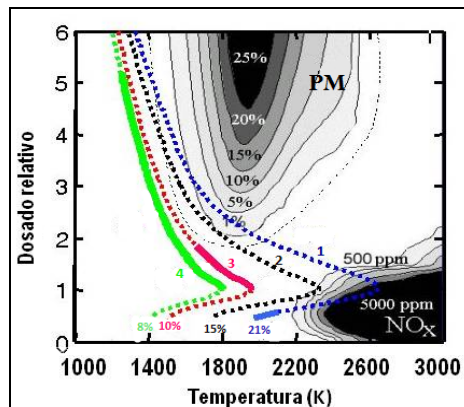


Fig. 1 – Producción de NOx y de materia particulada (PM) en función del ratio combustible-aire, de la concentración de oxígeno en la admisión y de la temperatura (Modificado de <http://www.eere.energy.gov/>; US Department of Energy).

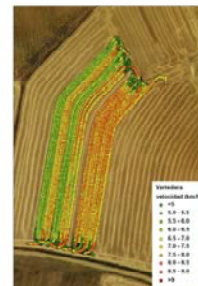
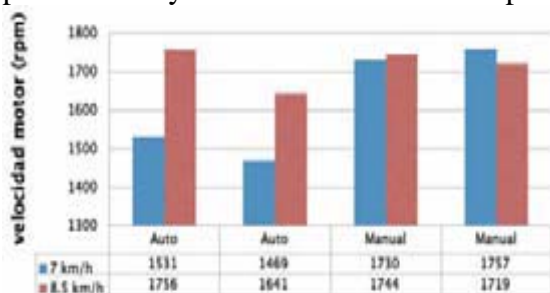


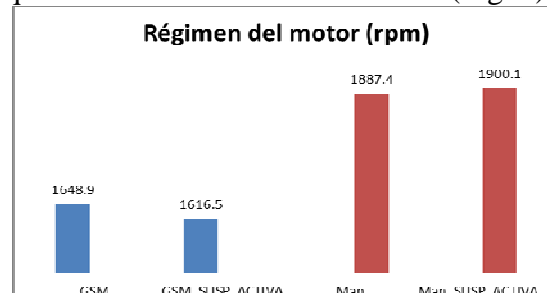
Fig. 2 – Izquierda: Detalle de la pantalla táctil y de los mandos de control en la cabina de un tractor. Derecha: Trayectorias y velocidades de una labor de campo.

En todos los ensayos se comparan los consumos y condiciones de motor cuando se emplea el cambio automático, o bien un control simultáneo de motor y transmisiones, frente al manejo manual. Una constante en todos los ensayos es comprobar que los tractoristas por defecto tienden a trabajar con niveles muy elevados de revoluciones (entre 1800 rpm y 2000 rpm), lo que redundaría en elevados consumos de combustible, mientras que los sistemas de gestión automático se sitúan, en la medida de lo posible, cerca de 1400-1600 rpm siempre que la labor lo permita. Además los sistemas de control automatizado tienden a impedir que se alcance el 100% de carga del motor.

En los cuatro casos analizados, en modo automático se realiza un más exhaustivo control de la presión de inyección de combustible aspecto que también incide en el consumo (Fig. 3).



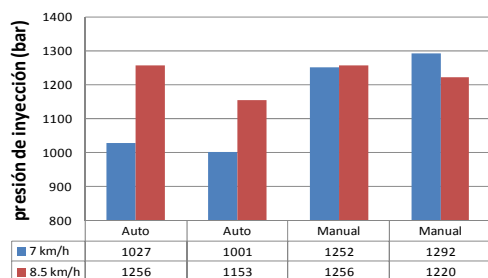
SCR (1)



SCR (2)



POLITÉCNICA



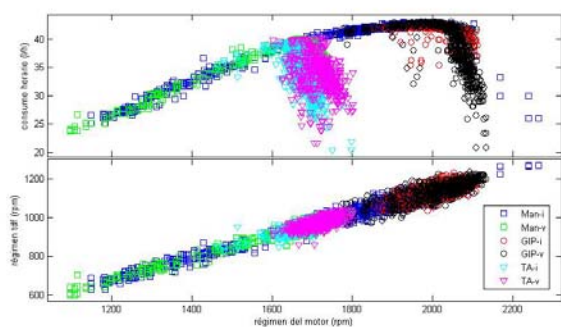
SCR(1)



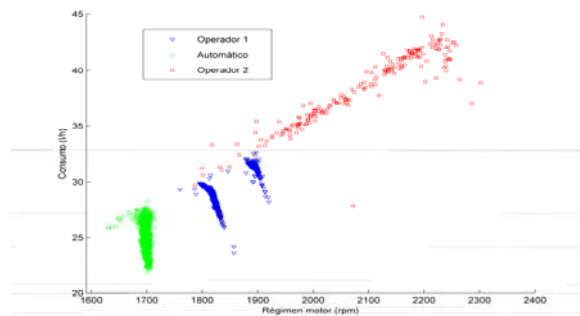
EGR(2)

Fig. 3 – Comparación de consumos y condiciones del motor en cambio automático y manejo manual para distintos tractores.

La adquisición de datos en dinámico permite reproducir gráficos equivalentes a las curvas de motor, donde se aprecia claramente el efecto de la regulación de la inyección donde los modos de funcionamiento automático se ajustan a las zonas de mínimo consumo (Fig. 4).



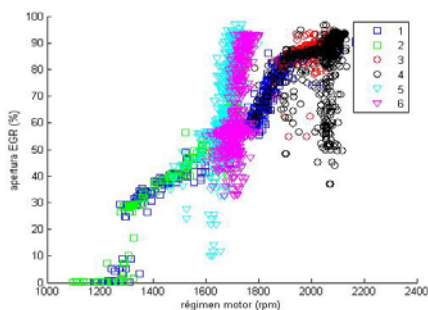
EGR(1)



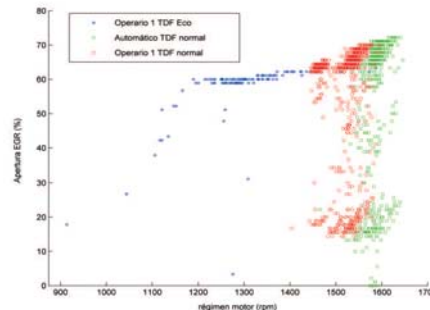
EGR(2)

Fig. 4 – Representaciones de los consumos y regímenes de la toma de fuerza frente al régimen del motor para manejos manuales y automáticos.

Un aspecto interesante en los sistemas EGR es comprobar cómo el porcentaje de recirculación tiende a aumentar con el régimen de motor, salvo cuando se alcanza un elevado nivel de carga, en cuyo caso decrece drásticamente para no comprometer la potencia disponible (Fig. 5).



EGR(1)



(EGR2)

Fig. 5 – Representaciones del nivel de recirculación frente al régimen del motor para diferentes condiciones de trabajo del vehículo.

Un aspecto también importante en la tecnología EGR es el mantenimiento del filtro de partículas (DPF) cuya regeneración puede ser pasiva o activa. La primera tiene lugar

automáticamente cuando el filtro de partículas está a la temperatura adecuada durante el trabajo (generalmente en transporte), mientras que la regeneración activa invierte energía adicional para elevar artificialmente la temperatura de los gases de escape a la entrada del filtro hasta 300°C, instante en el que puede comenzar una post-inyección de combustible que reduce las partículas en el filtro). La Fig. 6 muestra un ejemplo de regeneración activa en el que se aprecia la evolución de temperaturas en el filtro, y la disminución de partículas depositada estimada mediante la diferencia de presión barométrica entre la entrada y salida del aire en el filtro. Este es también un caballo de batalla de la formación de los operadores ya que los filtros pueden sufrir por el uso inadecuado y generar un mantenimiento excesivo.

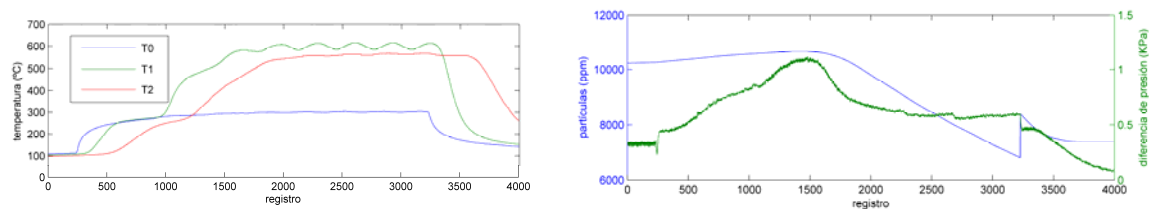
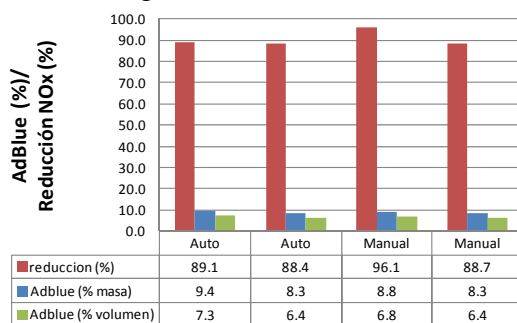
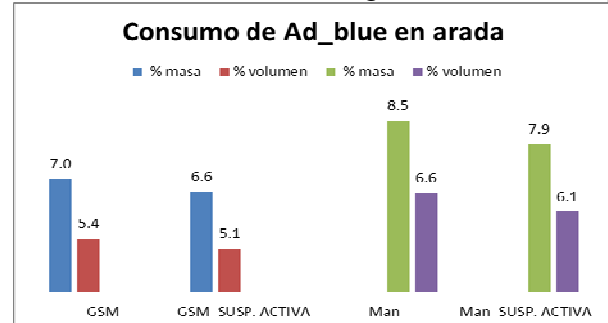


Fig. 6 – Temperatura y partículas en el filtro a lo largo de una regeneración activa.

En el caso de la tecnología SCR, el consumo de AdBlue ha de ser detenidamente evaluado tanto en masa como en volumen, y nos encontramos con marcas que además cuantifican con sensores de gases el descenso de NOx derivado de su funcionamiento (Fig. 7).



SCR(1)



SCR(2)

Fig. 7 – Consumos de AdBlue y descenso de NOx en vehículos con SCR para manejos manuales y automáticos.

En aquellos casos en que se dispone de una transmisión variable es posible además verificar su funcionamiento durante los trayectos de transporte por caminos rurales a velocidad constante (Fig. 8).

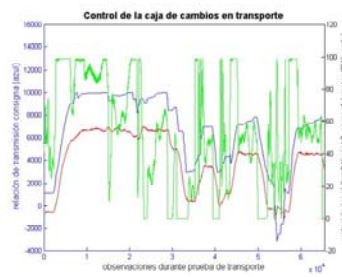
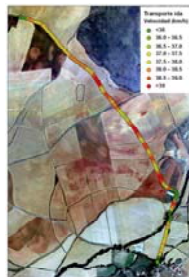


Fig. 8 – Trayecto y velocidades de un transporte y registros de la caja de cambio y la carga del motor durante el mismo.

Registro y análisis del historial psicrométrico durante el almacenamiento y el transporte refrigerado de productos perecederos

El punto de partida de esta línea de investigación es la vocación de contribuir a mantener la calidad de los productos perecederos, minimizando el consumo energético durante su almacenamiento y transporte frigorífico.

Los primeros trabajos del grupo dedicados a la supervisión del almacenamiento y transporte que emplean tecnologías WSN se remontan a 2008, donde se estudió el efecto del frío sobre la reducción de la duración de las baterías de los nodos, así como la pérdida de paquetes de información durante el almacenamiento que lejos de ser errática se acumulaba en periodos determinados (Fig. 9).

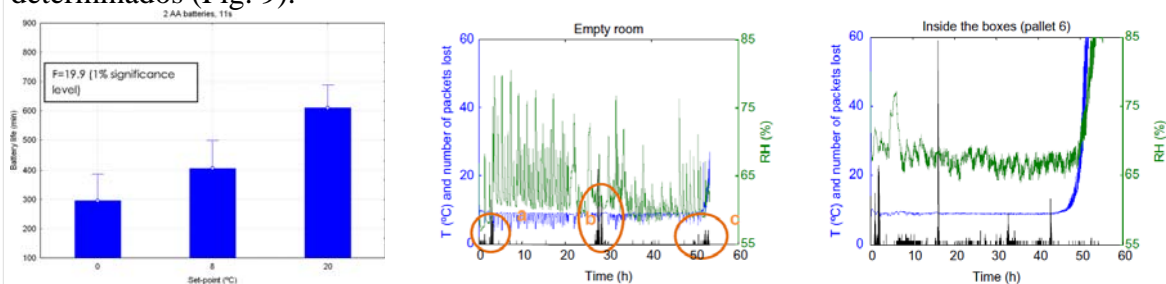


Fig. 9 – Izquierda: Vida útil de la batería de los nodos WSN para distintas temperaturas. Centro y derecha: Registros de temperatura y humedad relativa, y pérdida de paquetes de información (línea de color negro).

Se observó además el sesgo de la información de los sensores debido a su colocación en la placa base lo que incidía significativamente en el tiempo de respuesta de los sensores. Este último aspecto ha sido estudiado en 2012 en profundidad, evaluando los tipos de encapsulamiento sobre la respuesta dinámica, registrándose incrementos que cuadruplican el tiempo de respuesta (Fig. 10).

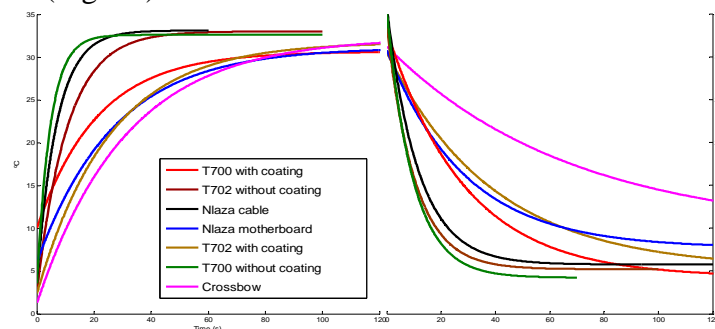


Fig. 10 – Respuesta dinámica de cuatro sensores de temperatura con diferentes condiciones de encapsulamiento.

En un estudio de 2010 hemos comprobado que el principal inconveniente de las WSN es su uso en transporte, pues la elevada densidad de carga y de contenido de producto hace que el alcance de la señal (en el rango de la frecuencia del agua) entre nodos sea mínima, impidiendo el correcto funcionamiento de la red, incluso en configuraciones de comunicación multipunto. Desde el punto de la las RFID los trabajos se han orientado a su introducción incluso en producto envasado y en localizaciones críticas dado que el registro en memoria interna de los datos solventa la limitación anterior (Fig. 11).



POLITÉCNICA

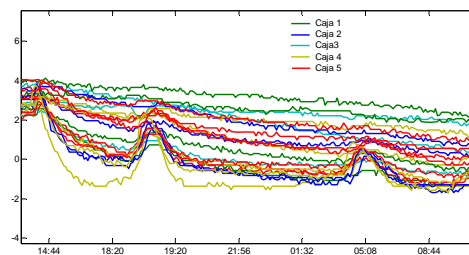


Fig. 11 – Tarjetas RFID en el interior de bolsas de lechuga 4ª gama y las series de temperatura registradas.

Los más recientes progresos en el ámbito de la supervisión de transporte y almacenamiento se relacionan con el empleo de la entalpía del aire (calculada a partir de la temperatura y la humedad relativa) como parámetro de control, dado que nos permite establecer de forma combinada las variaciones en el intercambio termodinámico entre el producto y el ambiente que habitualmente están en consonancia con el consumo energético. En nuestro caso, con este procedimiento hemos detectado en una empresa distribuidora nacional, errores esporádicos en el funcionamiento del sistema de desescarchado, que desacoplaban los datos de entalpía del aire en la cámara con la facturación de la energía consumida, al no coincidir las variaciones de entalpía del aire interior con los consumos calculados por ellos (basados en la temperatura de salida del glicol) (Fig. 12).

En lo que a la supervisión se refiere hemos propuesto el empleo de diagramas de fases. El espacio de fases (o diagrama de fases) es la representación más adecuada en la que se muestra el comportamiento de un sistema dinámico. De modo aproximado podemos reconstruir el espacio de fases de un sistema dinámico desconocido a través de una serie de tiempo obtenida por la medición de una de sus variables físicas a lo largo de tiempo. En nuestro caso hemos analizado con este método la temperatura y la entalpía en un transporte transoceánico intermodal refrigerado de 25.000 kg de limones desde Montevideo a Cartagena.

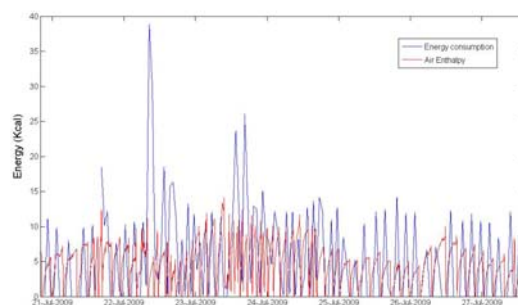


Fig. 12 – Consumo energético y entalpía del aire. Los periodos de desacoplamiento entre los dos parámetros identifican fallos en el sistema desescarchado

El análisis de las series de temperatura permitió la identificación de tres patrones de comportamiento que sirvió para el agrupamiento de los sensores y sus localizaciones y que se ratifica con los diagramas de fases (Fig. 13).

En lo que refiere a la entalpía, se presenta aquí la reconstrucción de los espacios de fases de los registros adquiridos a la entrada del evaporador; se distinguen tres periodos: la puesta en marcha del sistema, el transporte de larga duración y el de corta duración. Pueden distinguirse 3 patrones diferentes de atractores que permiten identificar diversos comportamientos durante el transporte, siendo el SSS el que presenta mayor área del ciclo (Fig. 14).

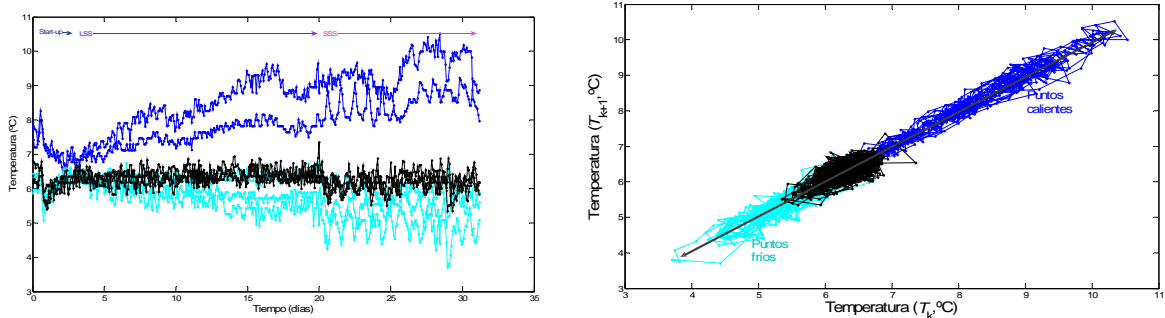


Fig. 13 –. Izquierda: evolución temporal de la temperatura en el interior del contenedor registrada por tres grupos de sensores. Derecha: diagrama de fases de temperatura a la izquierda puntos calientes (azul oscuro), en el centro zona de estabilidad térmica (negro) y a la derecha puntos fríos del contenedor (claro).

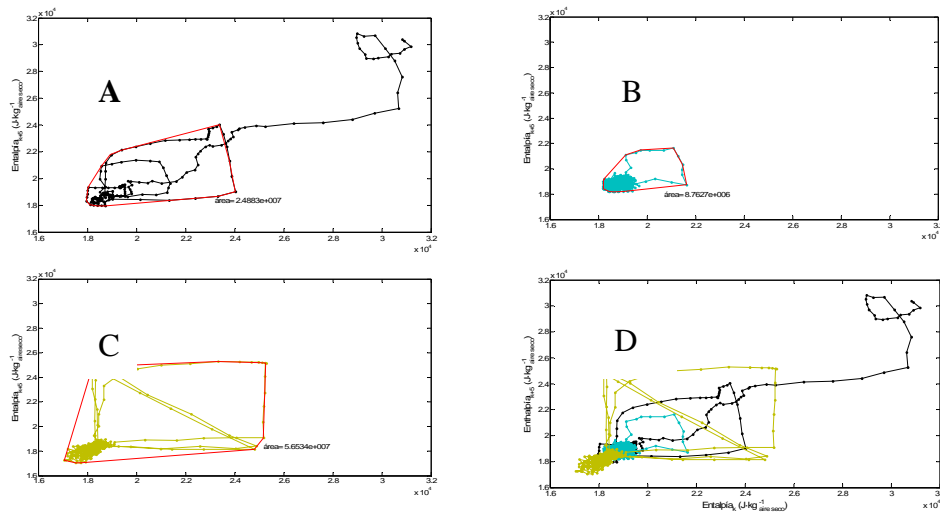


Fig. 14 –. Diagrama de fases de la entalpía de un sensor colocado a la entrada del evaporador. A: tiempo de puesta en marcha; B: transporte transoceánico de larga distancia; C: transporte de corta distancia; y D: viaje completo.

CONCLUSIONES GENERALES

El LPF-TAGRALIA trabaja con varios grupos de investigación reconocidos con el fin de abordar de forma multidisciplinar el análisis de procesos en campo y en almacenamiento y transporte. Mientras en los ensayos de tractores agrícolas, los registros de información provienen de las unidades electrónicas de control de los vehículos con frecuencias de hasta 100 Hz, en el análisis de transporte, la sensórica empleada es aportada directamente por los grupos investigadores, detectándose en muchos casos el límite de aplicabilidad: en las WSN debido a estibas de alta densidad, y en las RFID a la limitación de número de sensores que incorporan y a la frecuencia de muestreo, dado que su memoria es limitada. En ambos tipos de trabajos el análisis de datos, el procesado de información y la generación de patrones de comportamiento es la piedra angular de los resultados. Para la maquinaria agrícola, nos permite elaborar recomendaciones de uso del motor y las transmisiones verificables de forma gráfica. En la supervisión de transportes la generación de parámetros complejos y el análisis de diagramas de fases permiten la detección de fallos, el aislamiento de anomalías en el almacenamiento refrigerado, la reducción del consumo de energía.